

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61788-8

Première édition
First edition
2003-04

Supraconductivité –

Partie 8:

**Mesure des pertes en courant alternatif –
Méthode de mesure par bobines de détection
des pertes totales en courant alternatif des fils
composites supraconducteurs de Cu/Nb-Ti
exposés à un champ magnétique alternatif
transverse**

Superconductivity –

Part 8:

**AC loss measurements –
Total AC loss measurement of Cu/Nb-Ti composite
superconducting wires exposed to a transverse
alternating magnetic field by a pickup coil method**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61788-8:2003

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61788-8

Première édition
First edition
2003-04

Supraconductivité –

Partie 8:

**Mesure des pertes en courant alternatif –
Méthode de mesure par bobines de détection
des pertes totales en courant alternatif des fils
composites supraconducteurs de Cu/Nb-Ti
exposés à un champ magnétique alternatif
transverse**

Superconductivity –

Part 8:

**AC loss measurements –
Total AC loss measurement of Cu/Nb-Ti composite
superconducting wires exposed to a transverse
alternating magnetic field by a pickup coil method**

© IEC 2003 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembe, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

S

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives	8
3 Termes et définitions	8
4 Principe	12
5 Appareillage	14
6 Préparation de l'échantillon	16
7 Conditions d'essai	16
8 Calcul des résultats	20
9 Fidélité et exactitude	24
10 Rapport d'essai	24
Annexe A (informative) Explication de la mesure des pertes en courant alternatif avec le vecteur de Poynting	30
Annexe B (informative) Estimation de l'erreur géométrique dans la méthode par bobines de détection	32
Annexe C (informative) Méthode d'étalonnage recommandée pour l'aimantation et les pertes en courant alternatif	34
Annexe D (informative) Pertes par couplage pour différents types de champ magnétique appliqué	38
Annexe E (informative) Extension aux fils supraconducteurs à trois composants	40
Bibliographie	42
Figure 1 – Disposition normalisée de l'échantillon et des bobines de détection	28
Figure 2 – Circuit électrique type pour la mesure des pertes en courant alternatif par bobines de détection	28
Figure B.1 – Exemples de courbe de niveau pour le coefficient G avec un rayon d'enroulement R de l'échantillon et une différence a entre les rayons de l'échantillon et de chaque bobine de détection	32
Figure C.1 – Evaluation du champ critique à partir des courbes d'aimantation	36
Figure D.1 – Formes d'onde de champ magnétique appliqué dans une période T	38

CONTENTS

FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
1 Scope	9
2 Normative references	9
3 Terms and definitions	9
4 Principle	13
5 Apparatus	15
6 Specimen preparation	17
7 Testing conditions	17
8 Calculation of results	21
9 Precision and accuracy	25
10 Test report	25
Annex A (informative) Explanation of AC loss measurement with Poynting's vector	31
Annex B (informative) Estimation of geometrical error in the pickup coil method	33
Annex C (informative) Recommended method for calibration of magnetization and AC loss	35
Annex D (informative) Coupling loss for various types of applied magnetic field	39
Annex E (informative) Extension to three-component superconducting wires	41
Bibliography	43
Figure 1 – Standard arrangement of the specimen and pickup coils	29
Figure 2 – A typical electrical circuit for AC loss measurement by pickup coils	29
Figure B.1 – Examples of calculated contour line map of the coefficient G for a radius R of the coiled specimen and a difference a between radii of the specimen and each pickup coil	33
Figure C.1 – Evaluation of critical field from magnetization curves	37
Figure D.1 – Waveforms of applied magnetic field with a period T	39

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 8: Mesure des pertes en courant alternatif – Méthode de mesure par bobines de détection des pertes totales en courant alternatif des fils composites supraconducteurs de Cu/Nb-Ti exposés à un champ magnétique alternatif transverse

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes Internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61788-8 a été établie par le comité d'études 90 de la CEI: Supraconductivité.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/135A/FDIS	90/140/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2008. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –

**Part 8: AC loss measurements –
Total AC loss measurement of Cu/Nb-Ti composite
superconducting wires exposed to a transverse alternating
magnetic field by a pickup coil method**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61788-8 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
90/135A/FDIS	90/140/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2008. At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

Il est proposé des méthodes de mesure par magnétomètre et bobines de détection concernant les pertes en courant alternatif des composites filamentaires supraconducteurs de Cu/Nb-Ti dans les champs magnétiques transverses variables dans le temps. Celles-ci représentent les premières étapes de normalisation des méthodes de mesure des différentes causes de pertes en courant alternatif dans les champs transverses, configuration la plus fréquemment observée.

Il a été décidé de diviser la proposition initiale susmentionnée en deux documents couvrant deux méthodes normalisées. L'une d'elles décrit la méthode de mesure par magnétomètre des pertes par hystérésis et des pertes totales en courant alternatif à basse fréquence (ou vitesse de balayage) dans un champ magnétique à variation lente. La seconde décrit la méthode de mesure par bobines de détection des pertes totales en courant alternatif dans les champs magnétiques à plus haute fréquence (ou vitesse de balayage). La gamme de fréquences est de 0 Hz à 0,06 Hz pour la méthode par magnétomètre et de 0,005 Hz à 1 Hz pour la méthode par bobines de détection. Le chevauchement entre 0,005 Hz et 0,06 Hz correspond à une gamme de fréquences complémentaire pour les deux méthodes.

La présente norme décrit la méthode par bobines de détection. La méthode d'essai pour la normalisation de la mesure des pertes en courant alternatif décrite dans la présente norme s'appuie en partie sur les travaux de pré-normalisation du VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) sur les pertes en courant alternatif des supraconducteurs composites de NbTi [1]¹.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

INTRODUCTION

Magnetometer and pickup coil methods are proposed for measuring the AC losses of Cu/Nb-Ti composite superconducting wires in transverse time-varying magnetic fields. These represent initial steps in standardization of methods for measuring the various contributions to AC loss in transverse fields, the most frequently encountered configuration.

It was decided to split the initial proposal mentioned above, into two documents covering two standard methods. One of them describes the magnetometer method for hysteresis loss and low frequency (or sweep rate) total AC loss measurement in a slowly varying magnetic field, and the other describes the pickup coil method for total AC loss measurement in higher frequency (or sweep rate) magnetic fields. The frequency range is 0 Hz to 0,06 Hz for the magnetometer method and 0,005 Hz to 1 Hz for the pickup coil method. The overlap between 0,005 Hz and 0,06 Hz is a complementary frequency range for the two methods.

This standard covers the pickup coil method. The test method for standardization of AC loss covered in this standard is partly based on the Versailles Project on Advanced Materials and Standards (VAMAS) pre-standardization work on the AC loss of NbTi composite superconductors [1]¹.

¹ Figures in square brackets refer to the Bibliography.

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 8: Mesure des pertes en courant alternatif – Méthode de mesure par bobines de détection des pertes totales en courant alternatif des fils composites supraconducteurs de Cu/Nb-Ti exposés à un champ magnétique alternatif transverse

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61788 spécifie la méthode de mesure par bobines de détection des pertes totales en courant alternatif des fils supraconducteurs de Cu/Nb-Ti exposés à un champ magnétique alternatif transverse. Les pertes peuvent être à la fois des pertes par hystérésis et des pertes par couplage. La méthode normalisée permettant de mesurer uniquement les pertes par hystérésis en courant continu ou en champ magnétique à faible vitesse de balayage est spécifiée dans la CEI 61788-13 [2].

L'échantillon doit être un composite multifilamentaire rond ou rectangulaire dont la principale utilisation attendue concerne les applications avec bobines pulsées à des fréquences ou vitesses de balayage relativement élevées, jusqu'à 1 Hz ou 4 T/s, un diamètre ou une taille moyenne comprise entre 0,2 mm et 1,0 mm, un diamètre de filament entre 1 μ m et environ 50 μ m, et une constante de temps de couplage inférieure à 40 ms environ.

La présente méthode peut également s'étendre aux mesures de pertes en courant alternatif dans des gammes de fréquences et vitesses de balayage plus élevées, plus de 10 Hz ou 40 T/s, pour des fils supraconducteurs à trois composants (VEI 815-04-33) avec une constante de temps de couplage plus courte jusqu'à environ 0,1 ms (voir Annexe E).

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60050-815: *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Partie 815: Supraconductivité*

3 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 61788, les définitions de la CEI 60050-815 s'appliquent ainsi que les définitions suivantes.

3.1 pertes en courant alternatif **P**

dans un supraconducteur composite, puissance dissipée par suite de l'application d'un champ magnétique ou d'un courant électrique variable avec le temps

[VEI 815-04-54]

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 8: AC loss measurements – Total AC loss measurement of Cu/Nb-Ti composite superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field by a pickup coil method

1 Scope

This part of IEC 61788-8 specifies the measurement method of total AC losses by the pickup coil method in Cu/Nb-Ti composite superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field. The losses may contain both hysteresis and coupling losses. The standard method to measure only the hysteresis loss in DC or low-sweep-rate magnetic field is specified in IEC 61788-13 [2].

The specimen shall be a multifilamentary round or rectangular wire, expected to be mainly used for pulsed coil applications with relatively higher frequencies or sweep rates up to 1 Hz or 4 T/s, with diameter or average size from 0,2 mm to 1,0 mm, filament diameter from 1 μ m to around 50 μ m, and a coupling time constant less than about 40 ms.

The present method can be also extended to the AC loss measurement in a higher range of frequency and sweep rate up to more than 10 Hz or 40 T/s for three-component superconducting wires (IEV 815-04-33) with a shorter coupling time constant down to about 0,1 ms (see Annex E).

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-815, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity*

3 Terms and definitions

For the purposes of this part of IEC 61788, the definitions of IEC 60050-815 and the following apply.

3.1

AC loss

P

power dissipated in a composite superconductor due to application of time-varying magnetic field or current

[IEV 815-04-54]

3.2

pertes par hystérésis

P_h

pertes indépendantes de la fréquence, se produisant dans un supraconducteur sous l'effet des variations d'un champ magnétique

NOTE Les pertes par hystérésis sont dues aux propriétés magnétiques irréversibles de la substance supraconductrice liées à l'ancrage des lignes de flux.

[VEI 815-04-55]

3.3

pertes par courants de Foucault

P_e

pertes survenant dans la matrice normale d'un composite supraconducteur ou dans le matériau de structure lorsque le composite supraconducteur est exposé à un champ magnétique variable, qu'il s'agisse d'un champ extérieur ou d'un champ propre

[VEI 815-04-56, modifié]

3.4

pertes par (courant de) couplage

P_c

pertes dues au courant de couplage, survenant dans des fils supraconducteurs multifilamentaires ayant une matrice normale

[VEI 815-04-59]

3.5

constante de temps de couplage

τ

constante de temps caractéristique d'un courant de couplage perpendiculaire aux filaments dans un brin destiné aux basses fréquences

[VEI 815-04-60]

3.6

courants de protection

courants induits par une variation du champ magnétique externe appliqué à un supraconducteur et qui inclut des courants de couplage et des courants de Foucault pour les supraconducteurs composites

3.7

champ magnétique critique

H_c

champ magnétique correspondant à l'énergie de condensation supraconductrice à champ magnétique nul

[VEI 815-01-21]

3.8

aimantation d'un supraconducteur

moment magnétique divisé par le volume du supraconducteur

NOTE Le moment magnétique macroscopique est aussi égal au produit du courant de protection et de la surface délimitée par sa ligne de courant fermée dans un supraconducteur composite en plus du moment magnétique induit par tout flux magnétique piégé.

3.2**hysteresis loss** P_h

loss of the type whose value per cycle is independent of frequency arising in a superconductor under a varying magnetic field

NOTE This loss is caused by the irreversible magnetic properties of the superconducting material due to pinning of flux lines.

[IEV 815-04-55]

3.3**eddy current loss** P_e

loss arising in the normal matrix of a composite superconductor or the structural material when exposed to a varying magnetic field, either from an applied field or from a self-field

[IEV 815-04-56, modified]

3.4**(filament) coupling (current) loss** P_c

loss arising in multi-filamentary superconducting wires with a normal matrix due to coupling current

[IEV 815-04-59]

3.5**coupling time constant** τ

characteristic time constant of coupling current directed perpendicularly to filaments within a strand for low frequencies

[IEV 815-04-60]

3.6**shielding current**

current induced by a change of external magnetic field applied to a superconductor and which includes coupling current and eddy current in composite superconductors

3.7**critical field strength** H_c

magnetic field strength corresponding to the superconducting condensation energy at zero magnetic field strength

[IEV 815-01-21]

3.8**magnetization of a superconductor**

magnetic moment divided by the volume of the superconductor

NOTE The macroscopic magnetic moment is also equal to the product of the shielding current and the area of the closed path in a composite superconductor together with the magnetic moment of any penetrated trapped flux.

3.9

méthode de mesure des pertes en courant alternatif par aimantation

méthode permettant de déterminer les pertes dues au courant alternatif, dans un matériau, à partir de la surface de la boucle de la courbe d'aimantation

NOTE Lorsque des bobines de détection sont utilisées pour mesurer la variation du flux magnétique afin de déduire l'aimantation de l'échantillon, la méthode est appelée méthode par bobines de détection.

[VEI 815-08-15, modifié]

3.10

méthode par bobines de détection

méthode permettant de déterminer les pertes dues au courant alternatif, dans un matériau, par évaluation de l'énergie électromagnétique dissipée dans ce matériau au moyen des bobines de détection

NOTE Le système de bobines de détection se compose principalement d'un enroulement primaire (aimant supraconducteur alimenté par un courant variable dans le temps) et d'une paire d'enroulements secondaires (bobines de détection), dont l'un (la bobine de détection principale) contient l'échantillon à mesurer et l'autre (la bobine de compensation) a deux fonctions: 1) compenser le signal provenant de la bobine de détection principale lorsqu'elle est vide, 2) fournir des informations sur le balayage du champ.

Ici, la disposition coaxiale et concentrique des bobines de détection illustrée à la Figure 1 est considérée comme la disposition normalisée pour la mesure des pertes en courant alternatif. Pour obtenir un volume suffisant d'éprouvette filamenteuse à mesurer et pour l'exposer à un champ magnétique transverse, il faut enrouler l'échantillon dans une bobine. L'échantillon ainsi préparé est également appelé «éprouvette enroulée».

3.11

pertes de fond

pertes apparentes générées par la méthode par bobines de détection lorsqu'il n'y a pas d'éprouvette dans les bobines de détection.

NOTE Les pertes de fond indiquent l'erreur expérimentale du système de mesure des pertes en courant alternatif utilisant la méthode par bobines de détection. Elles résultent d'un déplacement de phase du signal électrique dans le processus de compensation, d'un moment magnétique supplémentaire induit dans de nombreux composants de matériel d'expérience et d'un déséquilibre des bobines de détection.

3.12

section utile de l'échantillon enroulé

volume total de l'échantillon divisé par la hauteur d'enroulement de l'échantillon ou par la hauteur de la bobine de détection

3.13

flexion,

ε_b

déformation mécanique résultant d'une flexion pure, définie par $\varepsilon_b = 100 r / R$, où r est la demi-épaisseur du spécimen et R est le rayon de courbure de flexion

[VEI 815-08-03]

4 Principe

L'essai consiste à appliquer un champ magnétique alternatif transverse sur une éprouvette et à détecter le moment magnétique des courants de protection induits dans l'échantillon au moyen de bobines de détection afin d'estimer les pertes en courant alternatif définies à l'Article 3.

3.9

magnetization method for AC loss

method to determine the AC loss of materials from the area of the loop of the magnetization curve

NOTE When pickup coils are used to measure the change in flux, which is then integrated to get the magnetization of stationary coiled specimens, the method is called the pickup coil method.

[IEV 815-08-15, modified]

3.10

pickup coil method

method to determine the AC loss of materials by evaluating electromagnetic power flow into the materials by pickup coils

NOTE The pickup coil arrangement consists essentially of a primary winding (a superconducting magnet supplied with a time varying current) and a pair of secondary windings (pickup coils), one of which (the main pickup coil) contains the specimen to be measured and the other (the compensation coil) plays two roles: 1) it compensates the signal from the main pickup coil when empty; 2) it supplies the field sweep information.

Here the coaxial and concentric arrangement of the pickup coils as shown in Figure 1 is used as the standard one for the AC loss measurement. In order to obtain sufficient volume of the wire specimen to be measured and at the same time to expose it to a transverse magnetic field, it must be wound into a coil. The specimen so prepared is also referred to as the "coiled specimen".

3.11

background loss

apparent loss obtained by the pickup coil method in the case where no specimen is located inside the pickup coils

NOTE The background loss gives the experimental error in the system of the AC loss measurement by the pickup coil method. It results from phase shift of electrical signal in the compensation process, an additional magnetic moment induced in many components of experimental hardware, and imbalance in the pickup coils.

3.12

effective cross-sectional area of the coiled specimen

total specimen volume divided by the larger of the specimen coil height or the pickup coil height

3.13

bending strain

ε_b

strain in percent arising from pure bending defined as $\varepsilon_b = 100 r / R$, where r is a half of the specimen thickness and R is the bending radius

[IEV 815-08-03]

4 Principle

The test consists of applying an alternating transverse magnetic field to a specimen and detecting the magnetic moment of shielding currents induced in the specimen by means of pickup coils for the purpose of estimating the AC losses defined in Clause 3.

5 Appareillage

5.1 Appareil d'essai

L'appareil d'essai doit être construit de manière à exposer les bobines de détection et l'échantillon enroulé à un champ magnétique alternatif uniforme appliqué par un aimant supraconducteur.

Les bobines de l'appareil d'essai sont disposées comme décrit ci-dessous. Généralement, la bobine de détection principale et la bobine de compensation sont placées de manière coaxiale, respectivement à l'extérieur et à l'intérieur de l'échantillon enroulé.

Le champ magnétique alternatif appliqué doit présenter une uniformité élevée, comme indiqué en 7.1.5.

L'appareil d'essai comprend un sous-système qui calcule l'aimantation et les pertes en courant alternatif de l'échantillon en intégrant le signal des bobines de détection. Un circuit électrique type pour la mesure des pertes en courant alternatif est illustré à la Figure 2.

5.2 Bobines de détection

Les bobines de détection doivent être composées de fils isolés très fins, tels que des fils en cuivre de 0,1 mm de diamètre, afin d'éviter les courants de Foucault à basses températures.

Le support de bobinage des bobines de détection doit être composé d'un matériau non métallique et non magnétique, tel que du plastique renforcé en fibre de verre, de la résine phénolique, etc.

La bobine de détection principale doit être placée de manière coaxiale et concentrique à l'extérieur de la bobine de compensation. La disposition normalisée est illustrée à la Figure 1. Elle montre que la longueur de la bobine de compensation est identique à celle de la bobine de détection principale. Le nombre de spires de la bobine de compensation doit être en général légèrement supérieur au niveau d'équilibre dans lequel le flux de liaison total du champ magnétique appliqué dans la bobine de compensation est égal à celui de la bobine de détection principale.

Le système de bobines de détection doit être construit de manière à pouvoir facilement placer et retirer l'échantillon enroulé dans et hors du système.

La méthode par bobines de détection comporte une erreur géométrique en fonction de la disposition de l'échantillon enroulé et des bobines de détection. L'erreur géométrique est mentionnée brièvement dans l'Annexe B. Pour l'erreur géométrique restreinte inférieure à 1 %, la disposition suivante pour l'échantillon enroulé et les deux bobines de détection doit être la disposition normalisée: une éprouvette enroulée de 30 mm de hauteur et de 18 mm de rayon, des bobines de détection de 10 mm de haut, et 2 mm de différence entre le rayon de l'échantillon et celui de chaque bobine de détection. Lorsque la disposition de l'échantillon et des bobines de détection varie légèrement par rapport à la disposition normalisée ci-dessus, son erreur géométrique doit être estimée comme indiqué à l'Annexe B. Si l'erreur géométrique ne peut pas être estimée quantitativement, il pourrait être nécessaire d'effectuer l'étalonnage indiqué à l'Annexe C.

5.3 Circuit de compensation

Le flux de liaison total du champ appliqué dans la bobine de compensation est généralement légèrement supérieur à celui de la bobine de détection principale de par le nombre de spires choisi. Le signal provenant de la bobine de détection principale est contrebalancé par un signal réduit de la bobine de compensation au moyen d'un circuit de compensation. Pour un réglage précis du coefficient de réduction, appelé coefficient de compensation, le circuit de compensation a une exactitude de 10^{-4} à 10^{-5} afin de modifier le signal sans qu'il y ait déplacement de phase. Pour les conditions mentionnées ci-dessus, le circuit de compensation présente généralement la structure d'un diviseur de tension résistif.

5 Apparatus

5.1 Testing apparatus

The testing apparatus shall be constructed such that the pickup coils and a coiled specimen are arranged in a uniform alternating magnetic field applied by a superconducting magnet.

The coils of the testing apparatus are arranged as described below. Typically, the main pickup and compensation coils are coaxially positioned on the outside and inside of the coiled specimen, respectively.

The applied alternating magnetic field shall have a high uniformity as shown in 7.1.5.

The testing apparatus has a sub-system that calculates the magnetization and the AC loss of the specimen by integrating the signal of the pickup coils. A typical electrical circuit for the AC loss measurement is given in Figure 2.

5.2 Pickup coils

Pickup coils shall be made of very fine insulated wire, such as insulated copper wire with a diameter of 0,1 mm, to avoid eddy currents at low temperatures.

The pickup coil forms shall be made of non-metallic and non-magnetic material such as glass fiber reinforced plastic, phenol resin, etc.

The main pickup coil shall be arranged coaxially and adjusted concentrically outside the compensation coil. The standard arrangement is shown schematically in Figure 1, where the height of the compensation coil is the same as that of the main pickup coil. The number of turns in the compensation coil shall be usually adjusted to be a little larger than the balance level in which the total interlinkage flux of the applied magnetic field into the compensation coil is equal to that into the main pickup coil.

The pickup coil system shall be constructed so that the coiled specimen can be taken in and out easily from the system.

The pickup coil method has geometrical error in relation with the arrangement of the coiled specimen and the pickup coils. The geometrical error is mentioned briefly in Annex B. For a reduced geometrical error of less than 1 %, the following arrangement for the coiled specimen and the two pickup coils shall be the standard one; a height of 30 mm for the coiled specimen, a height of 10 mm for the pickup coils, a coil radius of 18 mm for the specimen, and a difference 2 mm between the radii of the specimen and each pickup coil. In the case where the arrangement of the specimen and pickup coils are a little different from the above standard one, the geometrical error in the arrangement shall be estimated, as shown in Annex B. If the geometrical error cannot be estimated quantitatively, the calibration indicated in Annex C may need to be performed.

5.3 Compensation circuit

The total interlinkage flux of the applied field in the compensation coil is usually a little larger than that in the main pickup coil by adjusting the number of turns. The signal from the main pickup coil is counterbalanced against a reduced signal of the compensation coil by means of the compensation circuit. For delicate adjustment of the reduction ratio, called the compensation coefficient, the compensation circuit has an accuracy of 10^{-4} to 10^{-5} to modify the signal without a phase shift. For the conditions mentioned above, the compensation circuit usually has the structure of a resistive potential divider.

6 Préparation de l'échantillon

6.1 Eprouvette enroulée

6.1.1 Enroulement de l'échantillon

Un support de bobinage doit être utilisé pour enrouler l'échantillon afin de réaliser un solénoïde monocouche. Lorsque l'échantillon de fil supraconducteur est électriquement isolé, les spires enroulées du solénoïde doivent être jointivement enroulées. Si l'échantillon est nu, les spires doivent être séparées par une entretoise non métallique et non magnétique telle qu'une ligne de pêche pour assurer l'isolation des spires de l'échantillon. Le diamètre de l'entretoise doit correspondre environ à la moitié du diamètre de l'échantillon.

6.1.2 Configuration de l'échantillon enroulé

La hauteur d'enroulement de l'échantillon doit être supérieure à trois fois celle de la bobine de détection afin de réduire l'erreur géométrique résultant des effets d'extrémité de l'échantillon enroulé.

6.1.3 Flexion maximale

La flexion maximale induite dans l'enroulement de l'échantillon ne doit pas dépasser 5 % et doit être de préférence de 3 %.

6.1.4 Traitement de la section d'extrémité de l'échantillon

Les deux extrémités de l'échantillon doivent être ouvertes et les filaments ne doivent pas pouvoir entrer en contact. Les deux extrémités de l'échantillon doivent être polies avec du papier émeri de 12 μm (800 mesh) à 7 μm (1 000 mesh).

6.2 Structure d'enroulement de l'échantillon

La structure sur laquelle l'échantillon est enroulé doit être composée d'un matériau non métallique et non magnétique tel que du plastique renforcé en fibre de verre et de la résine phénolique. Un adhésif, par exemple du cyanoacrylate ou de la résine époxy, doit être utilisé pour fixer l'échantillon sur la structure d'enroulement et conserver ainsi la structure d'enroulement cylindrique.

7 Conditions d'essai

7.1 Champ magnétique appliqué externe

7.1.1 Amplitude du champ appliqué

La condition normalisée relative à l'amplitude du champ appliqué doit être égale à 1 T. Il est également recommandé que cette amplitude soit comprise entre 0,3 T et 1 T.

7.1.2 Direction du champ appliqué

Dans l'échantillon enroulé, le champ externe doit être appliqué le long de l'axe de la bobine.

7.1.3 Forme d'onde du champ appliqué

La forme d'onde normalisée du champ appliqué doit être sinusoïdale ou triangulaire.

6 Specimen preparation

6.1 Coiled specimen

6.1.1 Winding of specimen

A coil form shall be used to wind the specimen into a single-layer solenoidal coil. When the specimen has an insulation layer, the turns of the coil shall be tightly wound right next to adjacent turns. When the specimen surface is not coated with an insulating material, the specimen shall be wound with an equal space between turns by inserting a non-metallic and non-magnetic spacer such as a fishing line to achieve turn-to-turn insulation of the specimen. The diameter of the spacer shall be approximately half the specimen diameter.

6.1.2 Configuration of coiled specimen

The coil height of the specimen shall be more than three times as high as that of the pickup coil in order to reduce geometrical error coming from the end effects of the coiled specimen.

6.1.3 Maximum bending strain

The maximum bending strain induced in the winding of the specimen shall not exceed 5 % and shall be preferably 3 %.

6.1.4 Treatment of terminal cross section of specimen

Both ends of a specimen shall be opened and filaments prevented from contacting each other. Both ends of the specimen shall be ground by emery paper of 12 μm (800 mesh) to 7 μm (1000 mesh).

6.2 Specimen coil form

The form upon which the specimen is wound shall be made of non-metallic and non-magnetic material such as glass fiber reinforced plastic and phenol resin. An adhesive, such as cyanoacrylate or epoxy resin, shall be used as a bonding material to bond the specimen to the coil form to keep the cylindrical coil shape.

7 Testing conditions

7.1 External applied magnetic field

7.1.1 Amplitude of applied field

The standard condition for the amplitude of applied field shall be 1 T. It is also recommended that the amplitude of applied field be ranged from around 0,3 T to 1 T.

7.1.2 Direction of applied field

In a coiled specimen, the external field shall be applied along the coil axis.

7.1.3 Waveform of applied field

The standard waveform of the applied field shall be a sine waveform or a triangular waveform.

7.1.4 Fréquence ou vitesse de balayage du champ appliqué

Lorsque la forme d'onde du champ appliqué est sinusoïdale, la gamme de fréquences de mesure doit être comprise entre 0,005 Hz et 1 Hz. Lorsque la forme d'onde du champ appliqué est triangulaire, la gamme de vitesses de balayage doit être comprise entre 0,02 T/s et 4 T/s. Le nombre de points de mesure doit être supérieur à cinq dans la gamme de fréquences ou de vitesses de balayage fixées de manière à calculer la constante de temps de couplage pour les pertes par couplage. Pour mesurer la dépendance à la fréquence des pertes en courant alternatif, l'amplitude du champ appliqué doit être fixe.

7.1.5 Uniformité du champ appliqué

Le champ appliqué doit être uniforme à 5 % près sur la longueur d'enroulement de l'échantillon et à 1 % près sur la longueur des bobines de détection.

7.2 Montage de l'échantillon

L'échantillon enroulé doit être disposé de manière coaxiale et concentrique entre une bobine de détection principale et une bobine de compensation.

7.3 Température de mesure

L'échantillon et les bobines de détection doivent être immergées dans de l'hélium liquide. La température de mesure doit être déterminée à l'aide d'un thermomètre étalonné ou d'une mesure de pression atmosphérique.

7.4 Procédure d'essai

7.4.1 Compensation

La première étape de la compensation consiste à mesurer un cycle d'hystérésis d'aimantation de l'échantillon pour une amplitude fixe du champ appliqué en soustrayant le signal de la bobine de compensation de celui de la bobine de détection principale tels qu'ils apparaissent. Dans la mesure où le flux de liaison totale du champ appliqué dans la bobine de compensation est légèrement supérieur à celui de la bobine de détection principale, la boucle d'aimantation obtenue est généralement inclinée par rapport à l'axe horizontal du champ magnétique appliqué.

Lors de la seconde étape de la compensation, le signal provenant de la bobine de compensation est légèrement modifié en multipliant par un coefficient de compensation légèrement inférieur à 1 au moyen du circuit de compensation afin de réduire l'inclinaison de la boucle d'aimantation.

Lors de l'étape finale, le coefficient de compensation est minutieusement déterminé afin que les deux branches de la courbe d'aimantation dans les phases ascendante et descendante soient symétriques par rapport à l'axe horizontal dans les zones entourant les valeurs extrêmes du champ appliqué.

7.4.2 Mesure des pertes de fond

Pour estimer les pertes de fond dans le système des bobines de détection, qui comprend les bobines de détection, le circuit de compensation, les amplificateurs, etc., les pertes apparentes doivent être mesurées lorsqu'il n'y a pas d'éprouvette dans les bobines de détection. La procédure de mesure est la même que pour les échantillons réels mentionnés en 7.4.3.

7.1.4 Frequency or sweep rate of applied field

When the waveform of the applied field is a sine waveform, the range of measurement frequency shall be from 0,005 Hz to 1 Hz. When the waveform of the applied field is a triangular waveform, the range of sweep rate shall be from 0,02 T/s to 4 T/s. The number of measurement points shall be more than five in the fixed range of frequency or sweep rate so as to calculate the coupling time constant for the coupling loss. In the measurement of frequency dependence of AC losses, the amplitude of the applied field shall be fixed.

7.1.5 Uniformity of applied field

The applied field shall have uniformity within 5 % over the coil length of the specimen and within 1 % over the length of the pickup coils.

7.2 Setting of the specimen

The coiled specimen shall be arranged coaxially and concentrically between a main pickup coil and a compensation coil.

7.3 Measurement temperature

The specimen and the pickup coils shall be immersed in liquid helium. The measurement temperature shall be determined using a calibrated thermometer or an atmospheric pressure measurement.

7.4 Test procedure

7.4.1 Compensation

The first step of the compensation is to measure a hysteresis loop of magnetization of the specimen for a fixed amplitude of applied field by subtracting the signal of the compensation coil from that of the main pickup coil as they are. Since the total interlinkage flux of the applied field into the compensation coil is a little larger than that into the main pickup coil, the obtained magnetization loop is usually tilted against the horizontal axis of applied magnetic field.

In the second step of the compensation, the signal from the compensation coil is loosely modified by multiplying by a compensation coefficient slightly less than unity through the compensation circuit to reduce the tilt of magnetization loop.

In the final step, the compensation coefficient is delicately adjusted to get the condition that both branches of the magnetization curve in increasing and decreasing processes are symmetric with respect to the horizontal axis in the regions around the extreme values of applied field.

7.4.2 Measurement of background loss

In order to estimate background loss in the pickup coil system including pickup coils, compensation circuit, amplifiers, etc., apparent loss shall be measured when no specimen is located inside the pickup coils. The measurement procedure is the same as that for usual specimens mentioned in 7.4.3.

7.4.3 Mesure des pertes

Dans la méthode par bobines de détection, les pertes en courant alternatif doivent être calculées en intégrant le produit du signal compensé provenant de la bobine de détection principale (relatif au moment) et du signal provenant de la bobine de compensation (relatif au champ), selon l'Equation (3). Si les pertes de fond apparentes ne peuvent être négligées dans le système de mesure de pertes, les pertes en courant alternatif pour l'échantillon doivent être calculées en soustrayant les pertes de fond des pertes apparentes mesurées. Lors de la correction par les pertes de fond, il faut tenir compte du signe de la valeur des pertes de fond.

Les pertes en courant alternatif peuvent également être estimées en intégrant l'aimantation pour le champ appliqué dans une période, comme indiqué à l'Annexe A.

7.4.4 Etalonnage

En général, l'étalonnage est une procédure de base pour la mesure des pertes en courant alternatif avec détection imparfaite des signaux. La méthode d'étalonnage recommandée est indiquée à l'Annexe C. En revanche, si les conditions relatives à la configuration des bobines de détection et de l'échantillon enroulé, indiquées aux Articles 5 et 6 et à l'Annexe B, sont satisfaites, les mesures des pertes en courant alternatif et de l'aimantation avec une erreur inférieure à quelques pour cent peuvent être effectuées sans étalonnage. Toutefois, lorsque la configuration du système de bobines de détection ne répond pas aux conditions données, l'étalonnage indiqué à l'Annexe C pourrait être nécessaire.

8 Calcul des résultats

8.1 Amplitude du champ magnétique appliqué

Le champ appliqué $H_e(t)$ doit être calculé en substituant la tension mesurée $U_c(t)$ à partir de la bobine de compensation dans l'Equation (1) :

$$H_e(t) = \frac{1}{\mu_0 N_c S_c} \int_0^t U_c(t') dt' \quad (1)$$

où N_c et S_c sont respectivement le nombre de spires et la zone de liaison par spire de la bobine de compensation. Le temps initial d'intégration est un point de passage par zéro de $U_c(t)$. Le niveau zéro du champ magnétique est égal à la valeur médiane entre les niveaux maximaux et minimaux de $H_e(t)$ dans l'Equation (1). L'amplitude doit être obtenue comme la moitié de la différence entre les valeurs maximale et minimale de $H_e(t)$.

8.2 Aimantation

L'aimantation macroscopique doit être calculée en substituant la tension compensée $U_{p-c}(t)$ provenant des bobines de détection dans l'Equation (2) :

$$M(t) = \frac{1}{\mu_0 N_p S_s} \int_0^t U_{p-c}(t') dt' \quad (2)$$

où N_p est le nombre de spires de la bobine de détection principale et S_s est une section utile de l'échantillon enroulé obtenue en divisant le volume total de l'échantillon par la hauteur de l'échantillon enroulé. Le temps initial d'intégration est un point de passage par zéro de $U_c(t)$. Le niveau zéro de l'aimantation est égal à la valeur médiane entre les niveaux maximaux et minimaux de $M(t)$ dans l'Equation (2).

7.4.3 Loss measurement

In the pickup coil method, the AC loss shall be calculated by integrating the product between the compensated signal from the main pickup coil (moment related) and the signal from the compensation coil (field related), following Equation (3). If the apparent background loss cannot be neglected in the system of loss measurement, the AC loss for the specimen shall be obtained by subtracting the background loss from the apparent, measured one. In the correction by the background loss, attention shall be paid to the sign of the background loss.

The AC loss can be also estimated by integrating the magnetization for the applied field through a period, as shown in Annex A.

7.4.4 Calibration

In general, calibration is a basic procedure in the AC loss measurement with imperfect detection of signals. A recommended method of the calibration is given in Annex C. On the other hand, if the conditions for the configuration of the pickup coils and the coiled specimen, indicated in Clauses 5 and 6 and Annex B, are satisfied, the AC loss and magnetization measurements with an error less than a few percent can be performed without calibration. However, when the configuration of the pickup coil system is outside the given conditions, the calibration indicated in Annex C may need to be performed.

8 Calculation of results

8.1 Amplitude of applied magnetic field

The applied field $H_e(t)$ shall be calculated by substituting the measured voltage $U_c(t)$ from the compensation coil into Equation (1):

$$H_e(t) = \frac{1}{\mu_0 N_c S_c} \int_0^t U_c(t') dt' \quad (1)$$

where N_c and S_c are the number of turns and the interlinkage area per turn of the compensation coil, respectively. The initial time of integration is a zero-crossing point of $U_c(t)$. The zero level of the magnetic field is equal to the midpoint between the maximum and minimum levels of $H_e(t)$ in Equation (1). The amplitude shall be obtained as a half of difference between the maximum and minimum values of $H_e(t)$.

8.2 Magnetization

The macroscopic magnetization shall be calculated by substituting the compensated voltage $U_{p-c}(t)$ from the pickup coils into Equation (2):

$$M(t) = \frac{1}{\mu_0 N_p S_s} \int_0^t U_{p-c}(t') dt' \quad (2)$$

where N_p is the number of turns for the main pickup coil and S_s is an effective cross-sectional area of the coiled specimen obtained from dividing the total specimen volume by the height of coiled specimen. The initial time of integration is also the zero-crossing point of $U_c(t)$. The zero level of the magnetization is equal to the midpoint between the maximum and minimum levels of $M(t)$ in Equation (2).

8.3 Courbe d'aimantation

Sur une période du champ magnétique appliqué débutant au temps initial, la courbe d'aimantation par hystérésis peut être obtenue en relevant les valeurs de l'aimantation pour le champ appliqué. Les niveaux zéro de l'aimantation et du champ appliqué peuvent être obtenus comme indiqué en 8.1 et 8.2.

8.4 Pertes en courant alternatif

Comme indiqué à l'Annexe A, les pertes en courant alternatif par cycle dans un fil supraconducteur peuvent être estimées en intégrant le vecteur de Poynting $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ sur une surface fermée entourant le fil pendant une période T dans un environnement électromagnétique alternatif. Dans ce cas, les pertes en courant alternatif P [W/m^3] doivent être calculées en substituant la tension compensée U_{p-c} provenant de la bobine de détection principale et le champ magnétique appliqué H_e dans l'Equation (3),

$$P = -\frac{f}{N_p S_s} \int_0^T U_{p-c}(t) H_e(t) dt \quad (3)$$

où f est la fréquence du champ magnétique appliqué égale à $1/T$. Dans des conditions périodiques stables, l'Equation (3) est équivalente à l'expression de l'intégration de l'aimantation déterminée par l'Equation (2) sur un cycle du champ appliqué, comme indiqué à l'Annexe A.

Lorsque les pertes par courants de Foucault dans le métal normal de l'échantillon sont un facteur mineur, les pertes en courant alternatif peuvent être classées dans deux éléments principaux de pertes par hystérésis P_h et de pertes par couplage P_c , en mesurant la dépendance à la fréquence pour une amplitude fixe du champ magnétique appliqué.

Si les pertes de fond ne peuvent pas être négligées dans le système de mesure des pertes, les pertes en courant alternatif doivent être calculées en soustrayant les pertes de fond des valeurs mesurées.

8.5 Pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis par cycle, $W_h = P_h / f$, doivent être calculées comme un niveau extrapolé des pertes en courant alternatif par cycle à $f = 0$. Le niveau peut être extrapolé dans la dépendance à la fréquence des pertes en courant alternatif par cycle en utilisant une régression linéaire.

8.6 Pertes par couplage et constante de temps de couplage

Les pertes par couplage doivent être obtenues en soustrayant les pertes par hystérésis des pertes en courant alternatif totales. Dans le cas général d'une fréquence basse et d'une amplitude élevée du champ magnétique appliqué mentionné à l'Article 1, les pertes par couplage par cycle sont proportionnelles à la fréquence. Lorsque le champ magnétique appliqué présente une forme d'onde sinusoïdale, les pertes par couplage par cycle, W_c , dans les fils à section circulaire, sont théoriquement déduites de

$$W_c = 4 \pi^2 \tau \mu_0 H_m^2 f \quad (4)$$

où τ est la constante de temps de couplage et H_m est l'amplitude du champ magnétique appliqué. La constante de temps de couplage peut être calculée à partir du coefficient proportionnel des pertes par couplage par cycle selon la fréquence. Les expressions des pertes par couplage, dans les fils à section circulaire, pour différents types de formes d'onde du champ appliqué sont données à l'Annexe D.

8.3 Magnetization curve

Over a period of the applied magnetic field from the initial time, the hysteretic magnetization curve can be obtained by plotting the magnetization versus the applied field. The zero levels of the magnetization and the applied field can be obtained as shown in 8.1 and 8.2.

8.4 AC loss

As shown in Annex A, the AC loss per cycle in a superconducting wire can be estimated by integrating Poynting's vector $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ on a closed surface surrounding the wire over a period T of alternating electromagnetic environment. In this case, the AC loss P [W/m³] shall be calculated by substituting the compensated voltage U_{p-c} from the main pickup coil and the applied magnetic field H_e into Equation (3),

$$P = -\frac{f}{N_p S_s} \int_0^T U_{p-c}(t) H_e(t) dt \quad (3)$$

where f is the frequency of the applied magnetic field and equal to $1/T$. Under steady periodic conditions, Equation (3) is equivalent to the alternative expression of integrating the magnetization defined by Equation (2) over a cycle of the applied field, as shown in Annex A.

In cases where eddy current loss in normal metal of the specimen is a minor component, the AC loss can be classified into two main components, hysteresis loss P_h and coupling loss P_c , by measuring the frequency dependence for a fixed amplitude of the applied magnetic field.

If the background loss cannot be neglected in the loss measurement system, the AC loss shall be obtained by subtracting the background loss from the measured value.

8.5 Hysteresis loss

The hysteresis loss per cycle, $W_h = P_h / f$, shall be obtained as an extrapolated level of the AC loss per cycle at $f = 0$. The level can be extrapolated in the frequency dependence of AC loss per cycle by using linear regression.

8.6 Coupling loss and coupling time constant

The coupling loss shall be obtained by subtracting the hysteresis loss from the total AC loss. In the usual case of low frequency and high amplitude of applied magnetic field mentioned in Clause 1, the coupling loss per cycle is proportional to the frequency. For a sine waveform of the applied magnetic field, the coupling loss per cycle, W_c , in the round wires is theoretically predicted by

$$W_c = 4 \pi^2 \tau \mu_0 H_m^2 f \quad (4)$$

where τ is the coupling time constant and H_m is the amplitude of applied magnetic field. The coupling time constant can be calculated from the proportional coefficient of the coupling loss per cycle to the frequency. The expressions of the coupling loss in the round wire for various types of waveforms of the applied field are given in Annex D.

9 Fidélité et exactitude

La fidélité attendue de cette méthode est donnée par le coefficient de variation (CV; rapport de l'écart-type à la moyenne). Le CV est inférieur à 5 % pour les pertes par hystérésis et à 10 % pour la constante de temps de couplage.

9.1 Exactitude des instruments de mesure

Des instruments de mesure ayant une exactitude à 1 % près doivent être utilisés. Les instruments de mesure des dimensions doivent avoir une exactitude à 1 % près.

9.2 Exactitude du champ appliqué

Un système de champ magnétique appliqué doit fournir le champ magnétique avec une exactitude à 1 % près et une fidélité à 0,5 % près. Le champ appliqué doit avoir une uniformité telle que décrite celle en 7.1.5.

9.3 Exactitude de la température de mesure

Un cryostat doit fournir l'environnement nécessaire pour la mesure des pertes en courant alternatif et l'échantillon doit être mesuré en immersion dans de l'hélium liquide. La température de l'échantillon est considérée comme identique à celle du liquide. La température du liquide doit être consignée avec une exactitude à 0,1 K près. Pour convertir la pression atmosphérique observée dans le cryostat en valeur de température, le diagramme de phases de l'hélium doit être utilisé. La mesure de la pression atmosphérique doit être suffisamment précise pour obtenir l'exactitude requise pour la mesure de la température. Pour des profondeurs d'hélium liquide supérieures à 1 m, une correction de hauteur peut être nécessaire.

10 Rapport d'essai

10.1 Identification de l'échantillon

L'échantillon doit être identifié, autant que possible, par les éléments suivants.

- a) Nom du fabricant
- b) Classification
- c) Numéro de lot
- d) Matériau de la matrice
- e) Forme et dimension de la section du fil
- f) Diamètre du filament
- g) Nombre de filaments
- h) Rapport cuivre/non-Cu
- i) Pas de torsade
- j) Rapport de résistance résiduelle (RRR)
- k) Epaisseur de la couche de matériau isolant

10.2 Configuration de l'échantillon enroulé

La configuration suivante de l'échantillon enroulé doit être consignée.

- a) Diamètre intérieur
- b) Diamètre extérieur

9 Precision and accuracy

The target precision of this method is given by coefficient of variation (COV; standard deviation divided by the average). The COV is less than 5 % for hysteresis loss and 10 % for coupling time constant.

9.1 Accuracy of measurement apparatus

Measurement apparatus with accuracy within 1 % shall be used. The dimension measuring apparatus shall have accuracy within 1 %.

9.2 Accuracy of applied field

An applied magnetic field system shall provide the magnetic field to an accuracy of 1 % and a precision of 0,5 %. The applied field shall have a uniformity given in 7.1.5.

9.3 Accuracy of measurement temperature

A cryostat shall provide the necessary environment for measuring AC loss and the specimen shall be measured while immersed in liquid helium. The specimen temperature is assumed to be the same as the temperature of the liquid. The liquid temperature shall be reported to an accuracy within 0,1 K. For converting the observed atmospheric pressure in the cryostat to a temperature value, the phase diagram of helium shall be used. The atmospheric pressure measurement shall be accurate enough to obtain the required accuracy of the temperature measurement. For liquid helium depths greater than 1 m, a head correction may be necessary.

10 Test report

10.1 Identification of specimen

The specimen shall be identified, if possible, by the following.

- a) Name of manufacturer
- b) Classification
- c) Lot number
- d) Matrix material
- e) Cross-sectional shape and dimension of the wire
- f) Filament diameter
- g) Number of filaments
- h) Copper / non-Cu ratio
- i) Twist pitch
- j) Residual resistance ratio (RRR)
- k) Thickness of insulation layer

10.2 Configuration of coiled specimen

The following configuration of the coiled specimen shall be reported.

- a) Inner diameter
- b) Outer diameter

- c) Hauteur
- d) Nombre de spires
- e) Section utile de l'échantillon enroulé
- f) Rapport volumique du volume d'échantillon enroulé dans la hauteur des bobines de détection par le volume d'espace compris entre les bobines de détection

10.3 Conditions d'essai

Les conditions d'essai suivantes doivent être consignées.

- a) Amplitude du champ appliqué
- b) Forme d'onde du champ appliqué
- c) Fréquence ou vitesse de balayage du champ appliqué
- d) Uniformité du champ appliqué
- e) Température de mesure
- f) Méthode de mesure de la température
- g) Durée d'échantillonnage de la tension induite des bobines de détection
- h) Intensité des pertes de fond

10.4 Résultats

Les résultats suivants doivent être consignés.

- a) Pertes totales en courant alternatif, y compris pertes par hystérésis et pertes par couplage
- b) Pertes par hystérésis
- c) Constante de temps de couplage ou pertes de couplage
- d) Courbe d'aimantation

Il est recommandé de consigner les résultats suivants, même lorsque des erreurs contrôlables, comme l'erreur géométrique du système de bobines de détection mentionné en 5.2 et dans l'Annexe B, peuvent être réduites.

- e) Pertes par hystérésis et courbe d'aimantation de l'échantillon étalon en plomb (Pb)
- f) Valeurs maximale et minimale de l'aimantation dans une éprouvette étalon en Pb exposée à un champ magnétique externe d'une amplitude de 0,1 T.
- g) Champ magnétique critique de l'échantillon étalon en Pb.

10.5 Instruments de mesure

Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes.

10.5.1 Bobines de détection

- a) Rapport de position entre les bobines de détection et l'échantillon enroulé
- b) Paramètres de la bobine de détection principale (diamètre intérieur, diamètre extérieur, hauteur, nombre de spires, matériau de la structure d'enroulement)
- c) Paramètres de la bobine de compensation (diamètre intérieur, diamètre extérieur, hauteur, nombre de spires, matériau de la structure d'enroulement)

10.5.2 Système de mesure

- a) Circuit électrique du système de mesure
- b) Matériau du cryostat

- c) Height
- d) Number of turns
- e) Effective cross-sectional area of coiled specimen
- f) Volume ratio of coiled specimen volume within the height of the pickup coils to the volume of the space between the pickup coils

10.3 Testing conditions

The following testing conditions shall be reported.

- a) Amplitude of applied field
- b) Waveform of applied field
- c) Frequency or sweep rate of applied field
- d) Uniformity of applied field
- e) Measurement temperature
- f) Measurement method of temperature
- g) Sampling time of induced voltage of pickup coils
- h) Magnitude of background loss

10.4 Results

The following results shall be reported.

- a) Total AC loss including a hysteresis loss and a coupling loss
- b) Hysteresis loss
- c) Coupling time constant or coupling loss
- d) Magnetization curve

It is recommended that the following results be reported, even in the case where controllable errors, such as the geometrical error of the pickup coil system mentioned in 5.2 and Annex B, can be reduced.

- e) Hysteresis loss and magnetization curve of the Pb standard specimen
- f) Maximum and minimum values of magnetization value in Pb standard specimen under external magnetic field with the amplitude of 0,1 T.
- g) Critical field strength of Pb standard specimen.

10.5 Measurement apparatus

The test report shall contain the following information.

10.5.1 Pickup coils

- a) Relation of the position between pickup coils and a coiled specimen
- b) Parameters of main pickup coil (inner diameter, outer diameter, height, number of turns, material of coil form)
- c) Parameters of compensation coil (inner diameter, outer diameter, height, number of turns, material of coil form)

10.5.2 Measurement system

- a) Electrical circuit of measurement system
- b) Material of cryostat

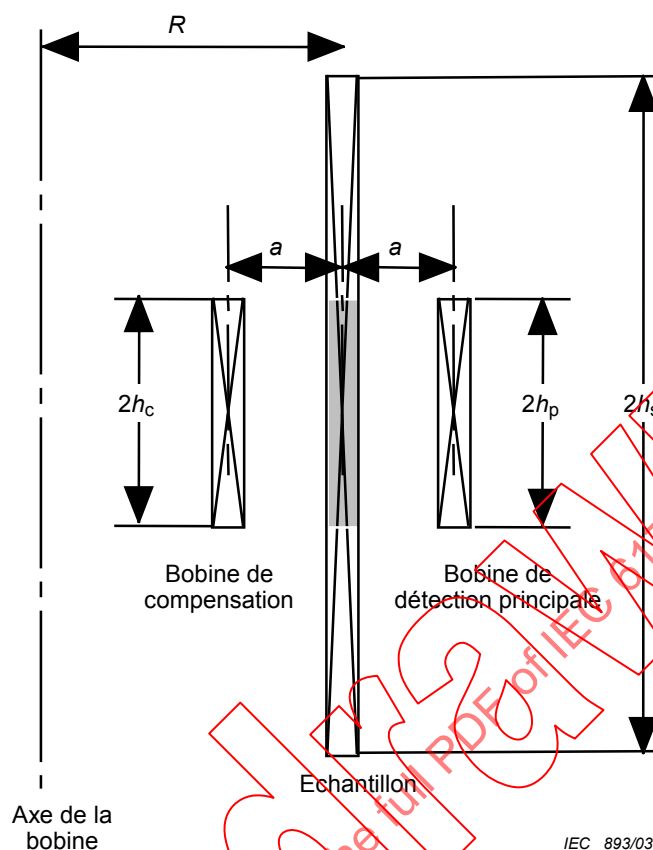


Figure 1 – Disposition normalisée de l'échantillon et des bobines de détection

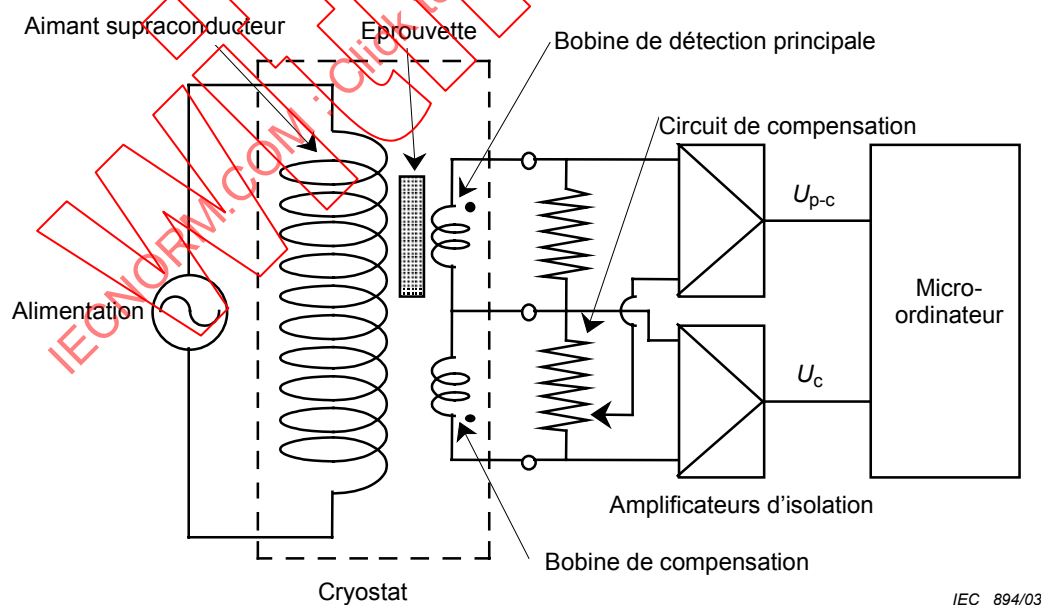


Figure 2 – Circuit électrique type pour la mesure des pertes en courant alternatif par bobines de détection

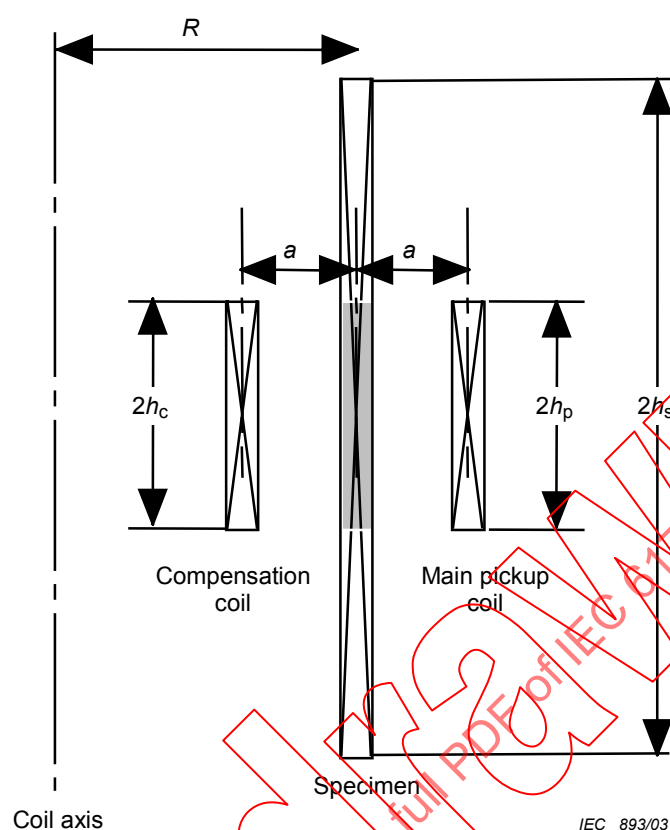


Figure 1 – Standard arrangement of the specimen and pickup coils

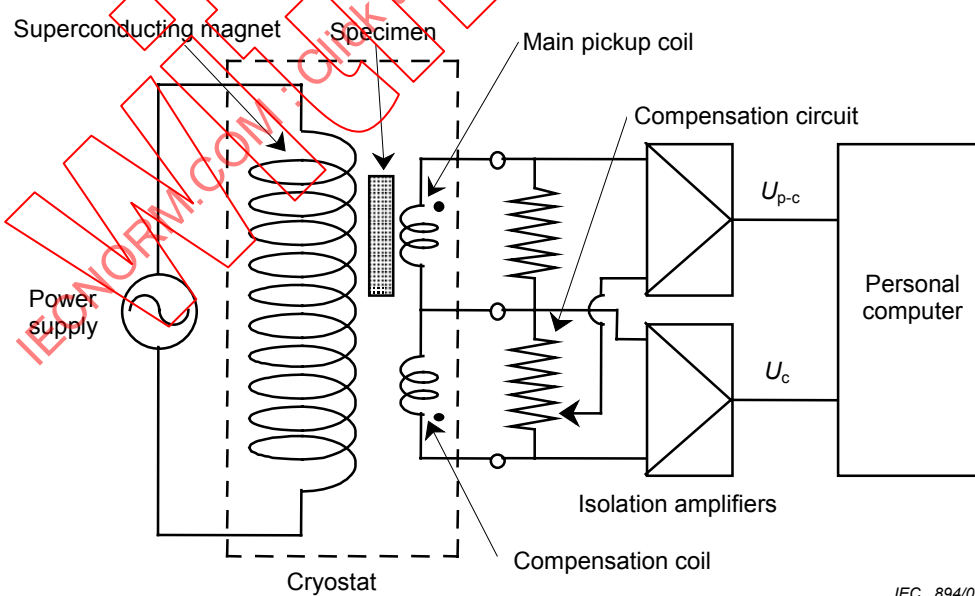


Figure 2 – A typical electrical circuit for AC loss measurement by pickup coils

Annexe A (informative)

Explication de la mesure des pertes en courant alternatif avec le vecteur de Poynting [3]

En général, les pertes en courant alternatif par cycle dans un fil supraconducteur peuvent être estimées en intégrant le vecteur de Poynting $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ sur une surface fermée A entourant le fil dans un environnement électromagnétique périodique. Les pertes en courant alternatif par cycle en volume unitaire de l'échantillon sont données par

$$W = -\frac{1}{V_s} \int_0^T dt \int_A d\mathbf{A} \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{A.1})$$

où $\mathbf{E}$ et $\mathbf{H}$ sont le champ électrique et le champ magnétique sur la surface A et V_s est le volume de l'échantillon entouré par la surface A . Lorsque l'échantillon est exposé à un champ magnétique alternatif uniforme H_e , les pertes en courant alternatif peuvent être mesurées par les bobines de détection de la manière suivante. Dans la disposition de l'échantillon et des bobines de détection illustrée à la Figure 1 par exemple, l'Equation (A.1) est modifiée pour devenir

$$W = -\frac{d_p}{V_s} \int_0^T dt H_e \int_{\Gamma} ds E = -\frac{1}{n_p V_s} \int_0^T dt H_e U_{p-c} \quad (\text{A.2})$$

où d_p est un pas moyen d'enroulement des bobines de détection, n_p est le nombre de spires par unité de longueur pour la bobine de détection principale, et Γ est un trajet le long de l'enroulement dans une couche. De cette façon, les pertes en courant alternatif peuvent être estimées en intégrant le produit du champ magnétique appliqué H_e et de la tension compensée aux bornes U_{p-c} provenant des bobines de détection pendant la période donnée. Dans la Figure 1, la portion de l'échantillon entouré par la surface fermée est indiquée en gris. En substituant l'aimantation M déterminée par l'Equation (2), l'Equation (A.2) devient

$$W = \mu_0 \int_0^T H_e \frac{\partial M}{\partial t} dt = \mu_0 \oint H_e dM \quad (\text{A.3})$$

Dans des conditions périodiques stables dans lesquelles la courbe d'aimantation par période est fermée, l'Equation (A.3) peut être modifiée comme suit

$$W = -\mu_0 \oint M dH_e \quad (\text{A.4})$$

L'erreur géométrique provenant de la configuration de l'échantillon et des bobines de détection est due à une approximation de la surface A au moyen d'une surface latérale de la bobine de détection. L'analyse quantitative est présentée à l'Annexe B.

Annex A (informative)

Explanation of AC loss measurement with Poynting's vector [3]

In general, AC loss per cycle in a superconducting wire can be estimated by integrating Poynting's vector $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ on a closed surface A surrounding the wire over a periodic electromagnetic environment. The AC loss per cycle in unit volume of the specimen is given by

$$W = -\frac{1}{V_s} \int_0^T dt \int_A d\mathbf{A} \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{A.1})$$

where $\mathbf{E}$ and $\mathbf{H}$ are electric field and magnetic field on the surface A and V_s is a volume of the specimen surrounded by the surface A . When the specimen is exposed to a uniform alternating magnetic field H_e , the AC loss can be measured by pickup coils in the following way. In arrangements of the specimen and the pickup coils shown in Figure 1, for example, Equation (A.1) is changed into

$$W = -\frac{d_p}{V_s} \int_0^T dt H_e \int_{\Gamma} ds E = -\frac{1}{n_p V_s} \int_0^T dt H_e U_{p-c} \quad (\text{A.2})$$

where d_p is an average pitch of the pickup coil winding, n_p is the number of turns per unit length for the main pickup coil, and Γ is a path along the winding in a layer. In this way, the AC loss can be estimated by integrating the product between the applied magnetic field H_e and the compensated terminal voltage U_{p-c} from pickup coils over the period. In Figure 1, the portion of the specimen surrounded by the closed surface is indicated by shadow. By substituting the magnetization M defined by Equation (2), Equation (A.2) leads to

$$W = \mu_0 \int_0^T H_e \frac{\partial M}{\partial t} dt = \mu_0 \oint H_e dM \quad (\text{A.3})$$

Under steadily periodic condition in which the magnetization curve per period is closed, Equation (A.3) can be changed into

$$W = -\mu_0 \oint M dH_e \quad (\text{A.4})$$

Geometrical error from the configuration of the specimen and pickup coils results from an approximation of the surface A by means of a side surface of the pickup coil. The quantitative consideration is presented in Annex B.

Annexe B (informative)

Estimation de l'erreur géométrique dans la méthode par bobines de détection

La méthode par bobines de détection présente une erreur géométrique, comme suggéré dans l'Annexe A, due à une détection imparfaite par les bobines de détection. Si l'aimantation apparente M obtenue à partir de l'Equation (2) est égale à $G(h_p, h_c, h_s, R, a) M_0$, l'Equation (A.4) conduit à l'expression suivante

$$W = -\mu_0 G(h_p, h_c, h_s, R, a) \oint M_0 dH_e \quad (\text{B.1})$$

où M_0 est l'aimantation réelle induite dans l'échantillon. Un coefficient G donne l'erreur géométrique et dépend uniquement d'une hauteur $2h_p$ de la bobine de détection principale, d'une hauteur $2h_c$ de la bobine de compensation et d'une hauteur d'enroulement $2h_s$ de l'échantillon enroulé, d'un rayon R de l'échantillon enroulé et d'une différence a entre les rayons de l'échantillon et de chaque bobine de détection [4]. Il est possible de mesurer de manière asymptotique les pertes en courant alternatif précises lorsque le coefficient G approche de 1.

Selon cette estimation de l'erreur géométrique, on obtient la condition $|G - 1,00| < 0,01$ dans la disposition normalisée de l'échantillon enroulé et des bobines de détection donnée en 5.2. La Figure B.1 indique également l'erreur géométrique lorsque la disposition est légèrement différente de la disposition normalisée.

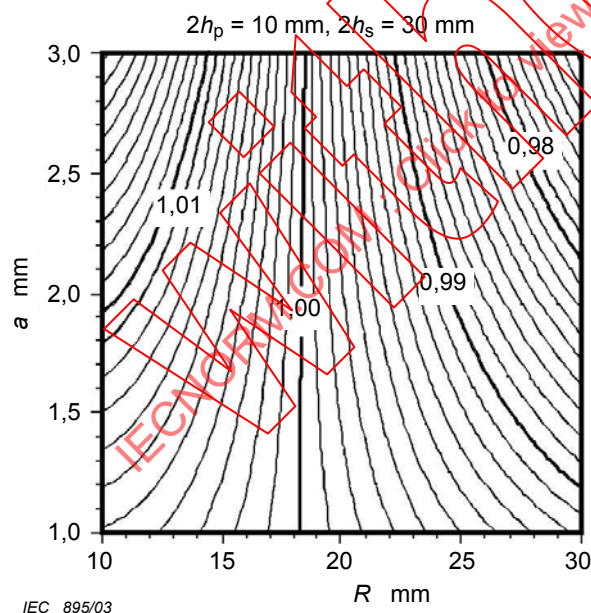


Figure B.1a – Exemple 1

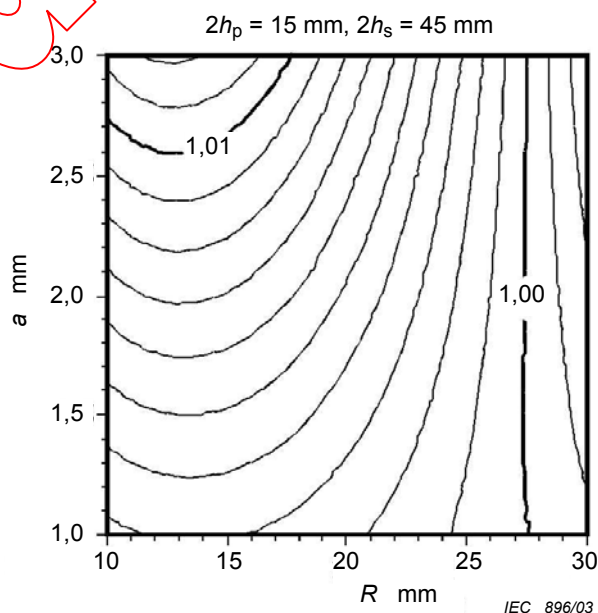


Figure B.1b – Exemple 2

Figure B.1 – Exemples de courbe de niveau pour le coefficient G avec un rayon d'enroulement R de l'échantillon et une différence a entre les rayons de l'échantillon et de chaque bobine de détection

Annex B (informative)

Estimation of geometrical error in the pickup coil method

The pickup coil method has geometrical error, as suggested in Annex A, due to imperfect detection by means of the pickup coils. If an apparent magnetization M obtained from Equation (2) is equal to $G(h_p, h_c, h_s, R, a) M_0$, Equation (A.4) leads to the following expression

$$W = -\mu_0 G(h_p, h_c, h_s, R, a) \oint M_0 dH_e \quad (\text{B.1})$$

where M_0 is an actual magnetization induced in the specimen. A coefficient G gives the geometrical error and is dependent only upon a height $2h_p$ of the main pickup coil, a height $2h_c$ of the compensation coil and a coil height $2h_s$ of the coiled specimen, a radius R of the coiled specimen and a difference a between the radii of the specimen and each pickup coil [4]. It is possible to measure asymptotically accurate AC losses when the coefficient G approaches unity.

According to this estimation of the geometrical error, we obtain the condition $|G - 1,00| < 0,01$ in the standard arrangement of the coiled specimen and pickup coils given in 5.2. Figure B.1 also shows the geometrical error for the case where the arrangement is a little different from the standard one.

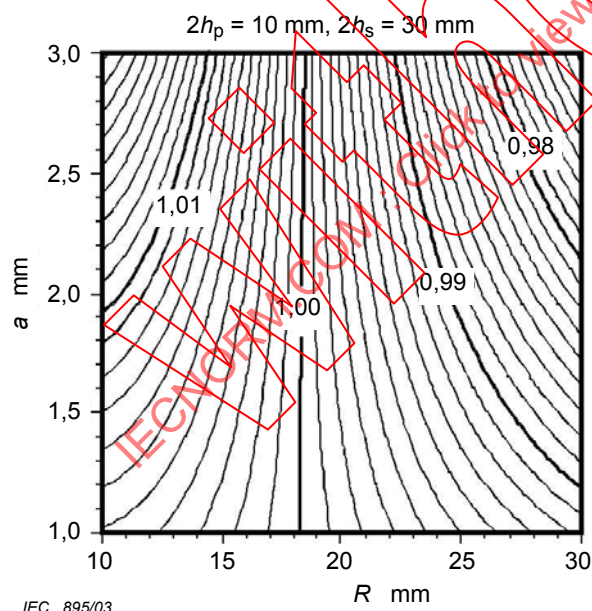


Figure B.1a – Example 1

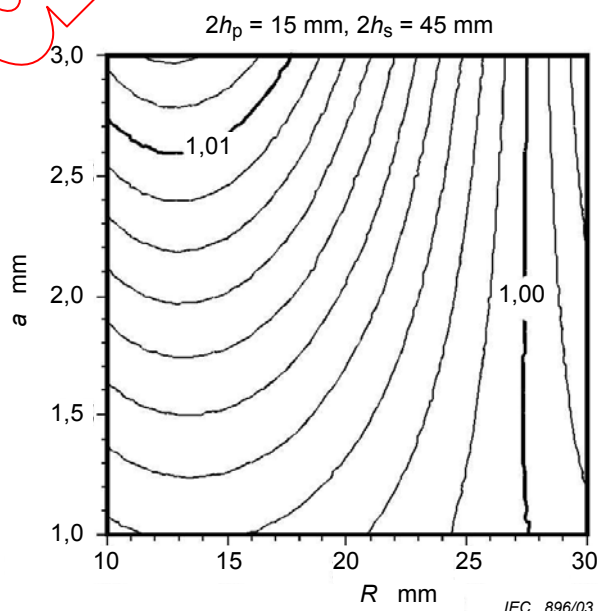


Figure B.1b – Example 2

Figure B.1 – Examples of calculated contour line map of the coefficient G for a radius R of the coiled specimen and a difference a between radii of the specimen and each pickup coil

Annexe C (informative)

Méthode d'étalonnage recommandée pour l'aimantation et les pertes en courant alternatif

C.1 Les grandes lignes de l'étalonnage

L'étalonnage de l'aimantation est recommandé pour compenser des mesures incomplètes de la variation dans le temps dans le moment magnétique induit dans l'échantillon, même lorsque des erreurs contrôlables, telles que l'erreur géométrique du système de bobines de détection mentionnée à l'Annexe B, peuvent être réduites. Une éprouvette étalon d'un supraconducteur de type I tel qu'un fil de plomb (Pb) doit être utilisée pour l'étalonnage de l'aimantation. L'aimantation peut être étalonnée au moyen de la valeur de crête de la courbe réversible de $M - H_e$, comme indiqué à l'Article C.4. La procédure de mesure de l'aimantation pour l'échantillon étalon est en principe identique à celle utilisée pour l'échantillon réel, à l'exception de la configuration d'enroulement et des conditions d'essai qui sont décrites ci-dessous.

C.2 Configuration d'enroulement de l'échantillon étalon

L'échantillon étalon doit être co-bobiné de manière lâche avec un fil non métallique et non magnétique tel qu'une ligne de pêche, pour l'isolation entre spires dans une bobine monocouche. Il est recommandé que le diamètre de l'entretoise corresponde à environ la moitié du diamètre de l'échantillon.

Les deux extrémités de l'échantillon étalon doivent être ouvertes. La condition de la hauteur d'enroulement pour l'échantillon étalon est la même que celle de l'échantillon réel.

C.3 Conditions d'essai de l'échantillon étalon

Lorsque l'échantillon étalon est en Pb, l'amplitude du champ appliqué doit être égale à 0,1 T. La forme d'onde du champ appliqué doit être sinusoïdale et la fréquence comprise dans la gamme 0,006 Hz à 0,06 Hz. Une forme d'onde triangulaire peut aussi être utilisée comme forme d'onde du champ appliqué.

C.4 Etalonnage pour l'aimantation de l'échantillon étalon

Il est bien connu que la pente de la courbe d'aimantation mesurée sur un supraconducteur de type I avec une désaimantation finie dépend de la magnitude du facteur de désaimantation, mais que la désaimantation maximale est toujours la même et égale à la force du champ magnétique critique H_c . Ceci est confirmé par les résultats expérimentaux obtenus avec un magnétomètre SQUID comme illustré à la Figure C.1a. Quand la courbure des courbes est estimée par extrapolation linéaire, les valeurs crêtes expérimentales sont toujours les mêmes et égales à une force de champ critique de 39,8 kA/m avec une erreur de 5 %, en parfait accord avec la force de champ mesurée directement, où l'aimantation disparaît.

Deux ensembles de résultats expérimentaux sur un fil en Pb pur par la méthode par bobines de détection sont également illustrés à la Figure C.1b. Dans cette figure, les traits pleins et pointillés indiquent respectivement les résultats pour des fréquences de 0,006 Hz et 0,06 Hz. Les bobines de détection et l'échantillon ont été préparées selon les conditions données dans la présente norme. Les courbes d'aimantation présentent une hystérésis qui dépend de la fréquence. Dans la gamme de fréquence ci-dessus, la branche ascendante est reproductible